

Ж. Ч. Янушкевич*, А. С. Луговская, А. Н. Беляков

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
г. Белгород

**yanushkevich@bsu.edu.ru*

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук А. Н. Беляков

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И ПРОЧНОСТЬ АУСТЕНИТНЫХ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ СТАЛЕЙ В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР ИСПЫТАНИЙ

Изучены микроструктура и механические свойства в интервале температур испытаний 20–700 °С аустенитных коррозионно-стойких сталей, подвергнутых многократной тепловой прокатке. Показано, что многократная теплая прокатка приводит к формированию ультрамелкозернистой и субмикроструктурной структуры с высокой плотностью внутризеренных дислокаций. Прочностные характеристики, такие как предел прочности и предел текучести аустенитных коррозионно-стойких сталей, подвергнутых прокатке при температурах 500–1000 °С, могут быть выражены линейными функциями температуры прокатки с коэффициентами, зависящими от материала и температуры испытания.

Ключевые слова: аустенитные коррозионно-стойкие стали, деформационное упрочнение, динамическая рекристаллизация.

Zh. Ch. Yanushkevich, A. S. Lugovskaya, A. N. Belyakov

EFFECT OF WARM DEFORMATION ON THE MICROSTRUCTURE AND STRENGTH OF AUSTENITIC STAINLESS STEELS IN THE WIDE TEST TEMPERATURE RANGE

The microstructure and mechanical properties at different test temperatures of austenitic stainless steels subjected to multiple warm rolling were investigated. Multiple warm rolling led to development of ultra-fine grained and submicrocrystalline structure with high dislocation density. The tensile properties of austenitic stainless steels subjected to warm rolling, such as ultimate tensile strength and yield stress, could be expressed by linear functions of rolling temperature with coefficients being dependent on steel and test temperature.

Keywords: austenitic stainless steels, strain hardening, dynamic recrystallization.

На сегодняшний день значительный практический интерес представляет решение проблемы повышения прочностных характеристик

аустенитных коррозионно-стойких сталей, т.к. применение сталей данного класса в качестве конструкционного материала сдерживается относительно низким пределом текучести (200–400 МПа). Одним из подходов к повышению прочностных свойств конструкционных материалов и сплавов является использование деформационно-термической обработки [1]. Эффективным механизмом с точки зрения структурного упрочнения является непрерывная динамическая рекристаллизация, которая развивается в процессе пластической деформации при температурах около половины температуры плавления. Однако закономерности непрерывной динамической рекристаллизации в процессе теплой деформации, в результате которой можно ожидать формирование субмикроструктурной структуры с размером зерен менее микрометра, изучены недостаточно полно. Целью данного исследования являются изучение влияния температуры многократной прокатки в интервале 500–1000 °С и температуры испытания в интервале 20–700 °С на деформационное поведение при растяжении образцов аустенитных коррозионно-стойких сталей, а также определение соотношения между параметрами структуры, формирующейся в процессе многократной теплой прокатки, и пределом текучести аустенитных коррозионно-стойких сталей при температурах испытаний 20–700 °С.

В качестве материала исследования были выбраны три стали аустенитного класса 300 серии: 03X19H10, 03X17H12M2 и 10X18H8ДЗБР. Перед проведением многократной прокатки стальные прутки исходного сечения 19×19 мм² были подвергнуты термической обработке, включающей нагрев и выдержку при 1100 °С в течение 30 мин с последующим охлаждением в воде. Полученная в результате термической обработки сталь рассматривается в данной работе как исходная. Многократную прокатку стальных прутков сечением 19×19 мм², предварительно нагретых до температур от 500 до 1000 °С, проводили в несколько проходов с обжатием ~20% за проход, с подогревом прутков после каждого двух проходов и окончательным охлаждением в воде.

Исследование микроструктуры сталей проводили в сечении, параллельном оси прокатки. Электронно-микроскопические исследования выполняли с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEOL-2100 и растрового электронного микроскопа Quanta 600 FEG 3D, оснащенного системой анализа дифракций обратно-рассеянных электронов (OIM).

Механические испытания на одноосное растяжение плоских образцов с размером рабочей части 1,5×3×16 мм³ проводили при температурах 20, 300, 500, 600 и 700 °С на универсальной машине Instron 5882.

Микроструктурные исследования показали, что многократная теплая прокатка до конечной истинной степени деформации $\epsilon \sim 2$ исследуемых

сталей приводит к удлинению исходных зерен вдоль направления прокатки и формированию новых мелких зерен, размер которых зависит от температуры обработки. Среднее поперечное расстояние между высокоугловыми границами в стали 10X18H8ДЗБР уменьшается от 0,95 до 0,4 мкм с уменьшением температуры прокатки от 1000 до 500 °С, размер субзерен при этом уменьшается от 195 до 115 нм. Стали 03X19H10 и 03X17H12M2 отличаются размером структурных элементов, формирующихся в процессе деформации до истинной степени деформации $\varepsilon \sim 2$. В стали 03X17H12M2 средний поперечный размер зерен уменьшается от 3,4 до 0,85 мкм, а размер субзерен от 240 до 150 нм, с уменьшением температуры прокатки от 900 до 500 °С (рис. 1, а–в).

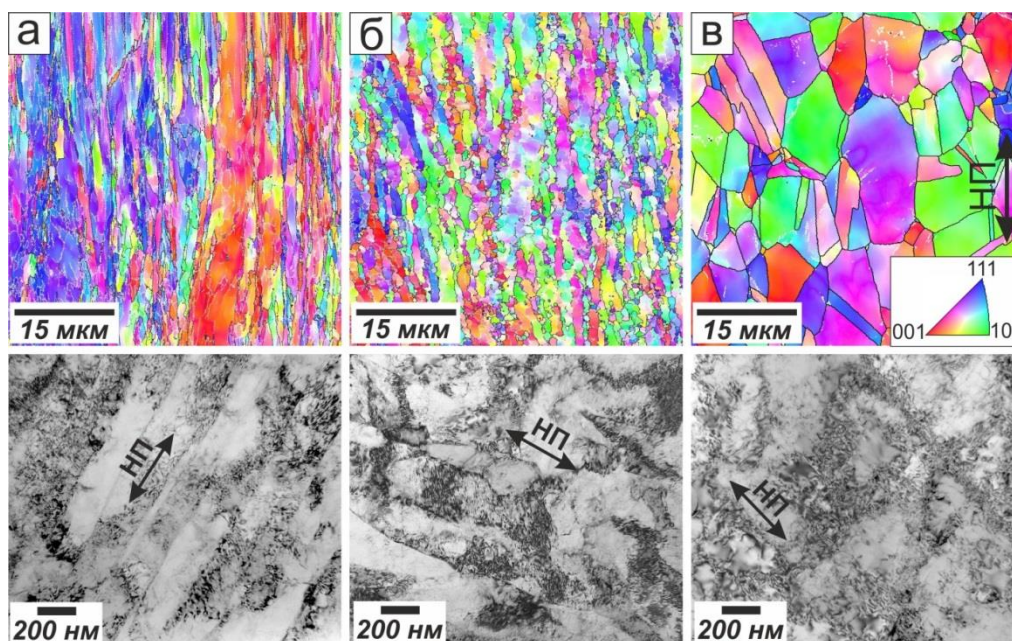


Рис. 1. Микроструктура аустенитной нержавеющей стали 03X17H12M2 после многократной прокатки: а – 500 °С; б – 700 °С; в – 900 °С

Понижение температуры прокатки приводит к значительному упрочнению сталей, которое сопровождается снижением пластичности. В целом прочность уменьшается с увеличением температуры испытаний. Уменьшение предела прочности с увеличением температуры происходит быстрее для образцов, подвергнутых теплой прокатке при относительно низких температурах, в то время как влияние температуры испытаний на предел прочности образцов, подвергнутых прокатке при повышенных температурах, незначительно (рис. 2). Таким образом, при температурах испытания 20–500 °С пределы текучести аустенитных коррозионно-стойких сталей, подвергнутых прокатке при температурах 500–1000 °С, нормированные на модуль сдвига, имеют очень слабую температурную зависимость, что свидетельствует о неизменности механизмов пластического течения в этой температурной области [2]. Небольшое

понижение пределов текучести с увеличением температуры связано с влиянием термоактивируемых процессов движения дислокаций.

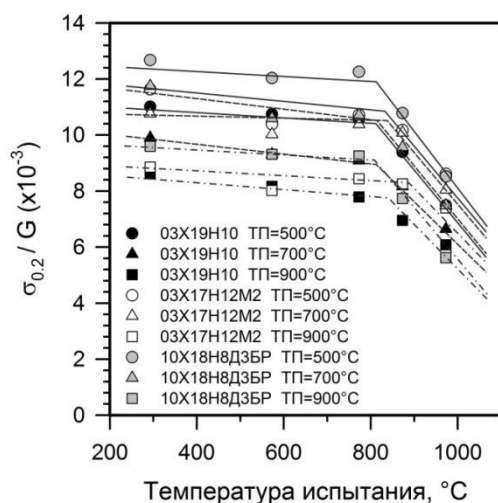


Рис. 2. Влияние температуры испытания на предел текучести, нормированный на модуль сдвига

Влияние температуры многократной прокатки и температуры испытания на прочностные характеристики исследуемых сталей показано на рис. 3.

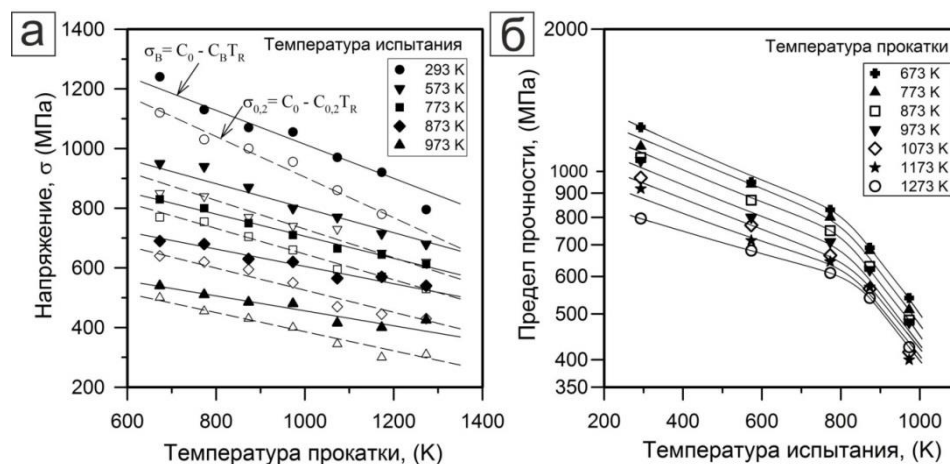


Рис. 3 – Влияние (а) температуры прокатки и (б) температуры испытания на прочностные характеристики исследуемых сталей

Зависимости предела прочности и предела текучести от температуры прокатки могут быть выражены линейными функциями, то есть $\sigma_B = C_0 - C_B T_R$ и $\sigma_{0,2} = C_0 - C_{0,2} T_R$ (рис. 3, а). Интересно отметить, что прочностные свойства подчиняются простому линейному закону в широком диапазоне температур прокатки независимо от некоторых различий в механизмах структурообразования, действующих при различных температурах прокатки. Предел прочности плавно уменьшается с увеличением температуры испытания до 500 °С. Дальнейшее повышение

температуры испытания приводит к резкому падению $\lg(\sigma_B)$ независимо от температуры прокатки (рис. 3, б).

Линейную зависимость напряжений течения от температуры прокатки исследуемых сталей можно объяснить влиянием плотности дислокаций ($\rho^{0.5}$) и средним размером зерна ($D^{-0.5}$), которые в свою очередь также могут быть выражены линейными функциями, как показано на рис. 4. Из графика видно, что для всех исследуемых сталей коэффициенты в линейном уравнении практически одинаковые, что может говорить о существовании закономерности, связанной с термоактивируемыми процессами.

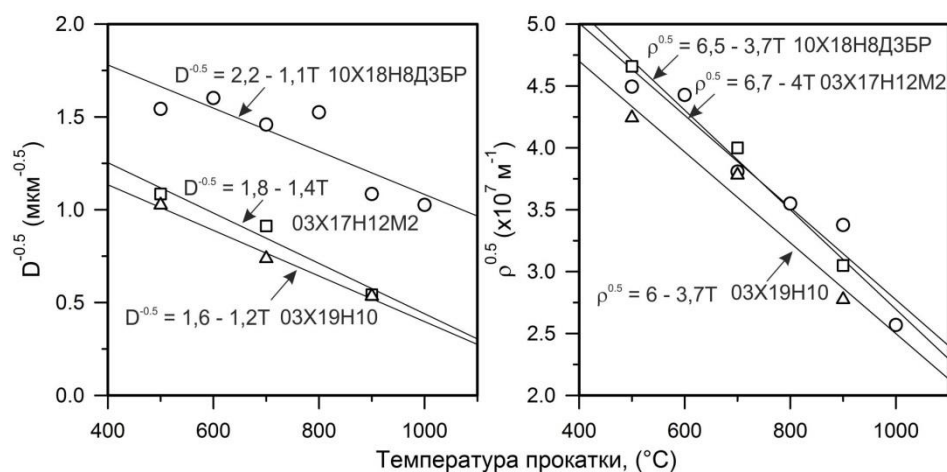


Рис. 4. Влияние температуры прокатки на структурные параметры исследуемых сталей

Таким образом, прокатка приводит к существенному упрочнению аустенитных коррозионно-стойких сталей. Понижение температуры прокатки до 500 °С позволяет получить стали с пределом текучести порядка 950–1050 МПа после суммарной истинной степени деформации 2. Предел прочности и предел текучести в интервале температур 20–700 °С могут быть выражены линейными функциями температуры прокатки, коэффициенты в которых зависят от стали и температуры испытания. В интервале температур испытания 20–500 °С изменение значений C_0 , C_B , $C_{0.2}$ коррелирует с температурной зависимостью модуля сдвига. При более высоких температурах уменьшение значений постоянных опережает изменение модуля сдвига.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сагарадзе В. В., Уваров А. И. Упрочнение и свойства аустенитных сталей // Наука. 1989. 270 с.
2. Yanushkevich, Z., Belyakov A., Kaibyshev R. Microstructural evolution of a 304-type austenitic stainless steel during rolling at temperatures of 773–1273K // Acta Materialia. 2015. V. 82. P. 244–254.